

PRORAČUN LINIJE NIVOVA U NEPRIZMATIČNOM KORITU ZA VELIKU VODU PRIMENOM METODE RAZMENE KOLIČINE KRETANJA IZMEĐU GLAVNOG KORITA I PLAVNIH POVRŠINA (PRIMER KORITA JEDNOSTAVNE GEOMETRIJE)

Dejana ĐORĐEVIĆ¹, Ivan STOJNIC², Nikola ROSIĆ¹

¹Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

²IST Lisbon, Portugal, EPFL, Lausanne, Switzerland

SAŽETAK

Cilj ovog rada je da se stručnoj javnosti prikažu mogućnosti modela razmene količine kretanja (MRKK) u proračunima linije nivoa duž neprizmatičnih korita za veliku vodu (KVV). Reč je o modelu koji je već uspešno primenjivan za procene krive protoka u prizmatičnim KVV, a koji istovremeno pruža mogućnost proračuna nagiba linije energije i linije nivoa kada je poznata vrednost protoka velike vode. Kao takav, model se može koristiti i za potrebe procene rizika od poplava i za rekonstrukciju poplavnog događaja. Model je u ovom radu proveren korišćenjem rezultata merenja u pravolinijskim neprizmatičnim kanalima sa obostrano proširujućim i obostrano sužavajućim plavnim površinama. Razmatrani su i slučajevi blagih i slučajevi naglih proširenja/suženja. Rezultati proračuna upoređeni su i sa onima koji se dobijaju primenom tradicionalnih modela koji se standardno primenjuju u inženjerskoj praksi. Pokazuje se da tradicionalni modeli potcenjuju nivoe u KVV preko 10%, a da su odstupanja dobijena primenom MRKK manja od 3%. Zadovoljavajuća slaganja postižu se i po pitanju raspodele protoka na glavno korito i plavne površine – odstupanja ne prelaze 3%, a samo za jednu vrednost protoka dostižu 8%.

Ključne reči: korito za veliku vodu, linija nivoa, model linijskog tečenja, razmena količine kretanja, nagib linije energije

1. UVOD

Ovaj rad još jedan je u nizu radova čiji je cilj da se srpska hidrotehnička praksa upozna sa novim trendovima u matematičkom modeliranju tečenja u koritu za veliku vodu (KVV). Upoznavanje naše stručne javnosti

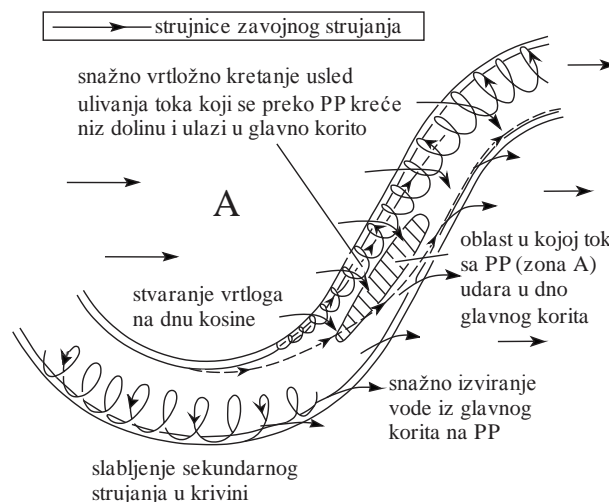
sa najnovijim istraživanjima i rezultatima u oblasti modeliranja tečenja u KVV u skladu je sa preporukama Direktive 2007/60/EC Evropskog parlamenta i Saveta o proceni i upravljanju rizicima od poplava koje se odnose na definisanje karti plavljenja na područjima ugroženim poplavama (tamo gde one ne postoje), ili na inoviranje postojećih karti plavljenja, jer su karte plavljenja osnov za procenu rizika od poplava. U našim stručnim krugovima sve više pažnje se poklanja proceni rizika od poplava o čemu govore brojni radovi i saopštenja kao što su, na primer, rad u kojem se analiziraju raspoloživi podaci za preliminarnu procenu rizika od poplava na teritoriji RS [14], radovi u kojima se opisuje metodologija za procenu i kartiranje rizika od poplava [17 i 18], kao i radovi koji se bave problematikom vezanom pripremu Plana upravljanja rizicima od poplava [3 i 5]. Posle velikih poplava 2014. godine usledio je veliki broj radova u kojima su analizirani uzroci [4 i 9] i posledice [5, 9 i 15] ovog povodnja, ali i oni u kojima se preispituje potreban stepen zaštite od velikih voda [2 i 5] i predlažu nova rešenja zaštite [3, 4, 9 i 12].

Međutim, ovladavanje savremenim, robustnim modelima za procene krivih protoka i proračune linije nivoa u KVV veoma je važno i za planiranje i operativno sprovođenje odbrane od poplava [10]. Zbog svoje robusnosti, ovakvi modeli mogu da budu sastavni deo baze modela ekspertnog sistema za odbranu od poplava čiji će se rezultati koristiti tokom procesa zaključivanja i donošenja odluka.

U prethodna dva rada [11 i 21] prikazan je model linijskog tečenja zasnovan na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina. Reč je o modelu koji su u okviru radne grupe za izučavanje tečenja u KVV pri Međunardom udruženju za hidraulička istraživanja razvili Buzmar i Zek sa ciljem da se proverí valja-

nost tradicionalnih modela za procenu krive protoka kao i da se oceni njihova uspešnost u proračunima linijskog jednolikog i nejednolikog tečenja u KVV. Model iz rada Buzmara i Zeka [6] prikazan je u radu [11] i upoređen sa tradicionalnim metodama – metodama jedinstvenog preseka (MJP) i hidraulički homogenih segmenata (MHHS), i savremenijim metodama: empirijskim postupkom, koji je predložio Ekers [1] i fizički zasnovanim postupkom, koji je predložio Radojković [20]. Za poređenje modela korišćene su krive protoka određene tokom laboratorijskih oglada u pravolinijskim prizmatičnim kanalima dvogubog trapeznog preseka sa plavnim površinama različite veličine i rapavosti. Ovi različiti modeli prizmatičnih KVV postavljani su u veliki laboratorijski kanal napravljen krajem 1980ih i početkom 1990ih u Hidrauličkoj laboratoriji u Volingfordu u Velikoj Britaniji [22] za potrebe izučavanja tečenja u KKV. Poređenja su pokazala odlična slaganja krivih protoka sračunatih po metodi razmene količine kretanja (MPKK) sa izmerenim krivama. Odstupanja računске od izmerene krive pro-toka ni u jednom od ispitivanih slučajeva nisu prelazila 6% [11]. Stoga je u radu [21] ovaj model primenjen za analizu uticaja geometrije i hidrauličkih otpora na osnovne odlike tečenja u prizmatičnim KKV – na razmenu količine kretanja (KK) između glavnog korita i plavnih površina i udeo te razmene u ukupnom „gubitku“ energije.

Laboratorijski i numerički ogladi u prizmatičnim KKV poslužili su za ispitivanje razmene količine kretanja između glavnog korita (GK) i plavnih površina (PP) posredstvom turbulentne difuzije koja je posledica smicanja između brzog toka u GK i znatno sporijeg toka na PP. Međutim, prirodna KVV su zbog krivudanja (mean-driranja) rečnog korita po pravilu neprizmatična. Prvi ogladi u velikom laboratorijskom kanalu u Volingfordu pokazali su da je tečenje u KVV sa meandrirajućim os-novnim koritom (slika 1) zbog superpozicije sekundarnih strujanja usled zakrivljenosti toka sa strujanjem koje nastaje izlivanjem vode iz GK na PP ili obrnuto, sa PP u GK, izuzetno složeno, i da je uticaj neprizmatičnosti korita bolje ispitivati u pravolinijskim kanalima [7]. Tako su tokom 1990ih i početkom 2000tih u hidrauličkim laboratorijama u Volingfordu, na Katoličkom univerzitetu u Luvan-la-Novu, u Belgiji (UCL) i u Nacionalnom institutu za nauku i tehnologiju u oblasti životne sredine i poljo-privrede u Lionu u Francuskoj (IRSTEA), napravljeni modeli neprizmatičnih KVV sa obostrano sužavajućim [7], obostrano proširujućim [19] i naizmenično sužavajućim i proširujućim plavnim površinama [8].

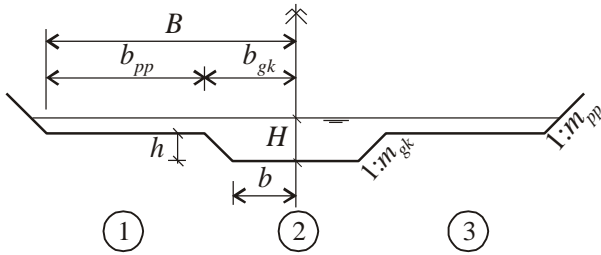


Slika 1. Međudejstvo tokova koji se kreću niz rečnu dolinu preko plavnih površina i kroz glavno korito [13]

Ovi modeli omogućili su da se osim razmene količine kretanja turbulentnom difuzijom ispita i razmena količine kretanja usled neprizmatičnosti korita, tzv. „geometrijska“ razmena KK. Prikupljeni rezultati merenja iskorišćeni su za detaljnu proveru još jednog modela za proračun nejednolikog tečenja u KKV, a to je model nezavisnih segmenata (MNS) koji su početkom XXI veka unapredili Prust i ost. [19]. Osnovu MNS predstavlja model Jena i ostalih iz 1985. godine [19].

Pošto za proveru MRKK do sada nisu korišćeni rezultati merenja u neprizmatičnim KVV sa proširujućim PP, u ovom radu će se prikazati mogućnosti MRKK za proračune nejednolikog tečenja i u neprizmatičnim KVV sa sužavajućim, i u onima sa proširujućim PP. Cilj rada je da se pokaže kolika su odstupanja od izmerene linije nivoa kada se ona računa tradicionalnim postupkom, koji uzma u obzir samo uticaj sile trenja na gubitak mehaničke energije duž toka, i kada se ona računa primenom MRKK. U slučaju MRKK razmotriće se slučajevi u kojima se uticaj „geometrijske“ razmene zanemaruje i oni u kojima se ovaj uticaj ne zanemaruje, kako bi se uticaji turbulentne difuzije i neprizmatičnosti korita razdvojili. Pored toga, prikazaće se udeo protoka na PP u ukupnom protoku neprizmatičnog KVV, kao i udeo trenja (I_{tr}) i ukupne razmene količine kretanja između GK i PP (turbulentne difuzije i „geometrijske“ razmene – $I_{rkk} = I_{rkk}^t + I_{rkk}^g$) u ukupnom gubitku energije (I_e).

S obzirom na to da je MRKK detaljno opisana u radu [11], u nastavku se daje samo kratko potsećanje na struk-



Slika 2. Geometrija KVV

turu modela sa posebnim osvrtom na članove kojima se modelira razmena količine kretanja između GK i PP (deo 2). U delu 3 opisuje se algoritam proračuna linije nivoa po ovoj metodi, a u delu 4, laboratorijski ogledi u KVV koji su u nastavku iskorišćeni za proveru modela. Na kraju se daje osvrt na mogućnosti primene MRKK za modeliranje nejednolikog tečenja u KVV.

2. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model linijskog ustaljenog tečenja u KVV, koji su predložili Buzmar i Zek [6], zasniva se na pretpostavci da je nivo vode u poprečnom preseku horizontalan i da se presek vertikalnim ravnima može podeliti na glavno korito i plavne površine (slika 2). U MRKK jednačine održanja mase i količine kretanja ispisuju se za svaki deo poprečnog preseka, pri čemu se uticaj izostavljenog susednog dela (slučaj PP) ili izostavljenih delova (slučaj GK) mora uzeti u obzir uvođenjem dodatnih članova. U jednačini održanja mase to je jedinični bočni protok q_b kojim su obuhvaćeni jedinični bočni dotoka u razmatrani segment q_{ul} i jedinično bočno isticanje iz tog dela poprečnog preseka q_{izl} . Jednačina održanja mase tada glasi:

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = q_{b,i} = q_{ul,i} - q_{izl,i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

U njoj su prostorna koordinata x i vreme t nezavisno promenljive, dok su površina razmatranog dela poprečnog preseka A_i , protok kroz taj deo preseka Q_i i jedinični bočni protok $q_{b,i}$, zavisno promenljive.

U jednačini održanja količine kretanja dodatni članovi opisuju bočnu razmenu količine kretanja. To su članovi $\rho q_{ul} u_b$ i $\rho q_{izl} U$, a jednačina glasi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A_i U_i) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A_i U_i^2) + \rho g A_i \frac{\partial Z}{\partial x} + \rho g A_i I_{tr,i} - \rho q_{ul,i} u_{b,i} + \rho q_{izl,i} U_i = 0, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

Veličine u ovoj jednačini imaju sledeće značenje: ρ je gustina vode, $U_i = Q_i / A_i$ je srednja brzina u razmatranom delu poprečnog preseka, Z je nivo vode u poprečnom preseku, g je ubrzanje Zemljine teže, $I_{tr,i}$ je nagib linije energije usled trenja, a $u_{b,i}$ komponenta brzine u pravcu glavnog toka u susednom delu poprečnog preseka, kojom se ostvaruje unos količine kretanja iz susednog u razmatrani deo.

U radu [11] prikazano je kako se kombinovanjem jednačina održanja mase i količine kretanja za jedan segment KVV dolazi do jednačine koja u uslovima ustaljenog tečenja opisuje zakon održanja energije:

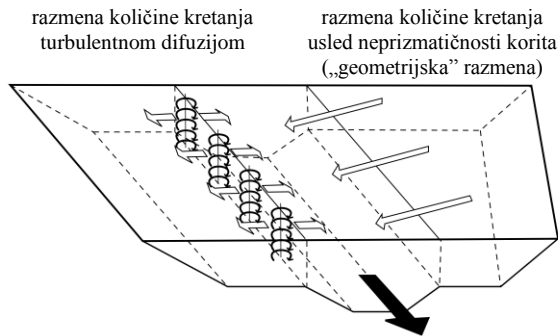
$$I_e \equiv -\frac{\partial}{\partial x} \left(Z + \frac{U^2}{2g} \right) = I_{tr} + \underbrace{\frac{q_{ul}(U - u_b)}{gA}}_{I_{rkk}} \quad (3)$$

Ovde je, radi jednostavnosti pisanja, izostavljen indeks dela poprečnog preseka. Prvi član sa desne strane znaka jednakosti predstavlja gubitak energije usled trenja, a drugi, gubitak usled razmene količine kretanja između susednih segmenata (I_{rkk}). Ovi članovi zajedno daju ukupan gubitak energije I_e , koji je isti za ceo poprečni presek, ali se njihov udeo u ukupnom gubitku može razlikovati po segmentima tog preseka. Odnos ove dve komponente gubitaka za svaki deo poprečnog preseka označava se sa $\chi_i (= I_{rkk,i} / I_{tr,i})$, tako da se izraz (3) skraćeno može napisati u sledećem obliku: $I_e = I_{tr,i} (1 + \chi_i)$.

Bočni dotok u razmatrani segment poprečnog preseka (slika 3) delom potiče od turbulentne difuzije (q_{ul}^t), a delom od razmene mase usled neprizmatičnosti korita (tzv. „geometrijske“ razmene, q_{ul}^g). Bočni dotok usled turbulentne difuzije modelira se pomoću modela mešanja u horizontalnoj ravni [6]:

$$q_{gpp}^t = q_{ppg}^t = \left| \overline{v'} \right| (H - h_{pp}) = \psi^t \left| U_{gk} - U_{pp} \right| (H - h_{pp}) \quad (4)$$

u kojem je apsolutna vrednost fluktuacije komponente brzine u poprečnom pravcu $\left| \overline{v'} \right|$ proporcionalna apsolutnoj vrednosti razlike srednjih brzina u dva susedna segmenta $\left| U_{gk} - U_{pp} \right|$. Koeficijent proporcionalnosti ψ^t je parametar MRKK. Veličine H i h_{pp} objašnjene su na slici 2.



Slika 3. Shema sila i uticaja za kontrolnu zapreminu jednog segmenta KVV (glavno korito)

Indeks „gpp“ označava bočni dotok iz glavnog korita na plavnu površinu, a indeks „ppg“, bočni dotok sa plavne površine u glavno korito. Kao što se vidi, u slučaju razmene količine kretanja turbulentnom difuzijom, ova dva bočna dotoka su jednaka.

Za razliku od bočnog dotoka usled turbulentne difuzije, bočni dotok usled „geometrijske“ razmene nije „simetričan“, jer se voda u zavisnosti od toga da li se PP širi ili sužava, ili izliva iz GK na PP (q_{gpp}^g – proširenje PP), ili se sa PP vraća u glavno korito (q_{ppg}^g – suženje PP). Kao što je prikazano u radu [11], ovi bočni dotoci/ isticanja sažeto se mogu napisati uvođenjem parametra κ , koji pokazuje smer kretanja vode u odnosu na ort normale na granicu GK:

$$q_{ppg}^g = \psi^g \kappa_{ppg} \frac{dK_{pp}}{dx} I_{tr,pp}^{1/2} \quad \text{i} \quad (5)$$

$$q_{gpp}^g = \psi^g \kappa_{gpp} \frac{dK_{pp}}{dx} I_{tr,pp}^{1/2}$$

gde je:

$$\kappa_{ppg} = \begin{cases} 0, & \frac{dK_{pp}}{dx} > 0 \\ -1, & \frac{dK_{pp}}{dx} < 0 \end{cases} \quad \wedge \quad \kappa_{gpp} = \begin{cases} 1, & \frac{dK_{pp}}{dx} > 0 \\ 0, & \frac{dK_{pp}}{dx} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Tako vrednost $\kappa = 1$ ukazuje da se smer kretanja vode poklapa sa ortom spoljne normale, tj. da voda ističe iz GK na PP. Suprotno, vrednost $\kappa = -1$ pokazuje da je smer kretanja vode suprotan smeru orta spoljne normale i da voda sa PP dotiče u GK. Vrednost $\kappa = 0$ pokazuje da razmatrani segment prima vodu iz susednog segmenta. U izraz (5) uvodi se koeficijent proporcio-

nalnosti ψ^g zbog promene nagiba I_{tr} na deonici na kojoj se menja protočnost PP [6 i 11].

3. POSTUPAK PRORAČUNA LINIJE NIVOVA

Zbog pretpostavke o horizontalnom nivou, proračun linije nivoa zasniva se na proceni nagiba linije energije za ceo presek (I_e). Ovaj nagib se, kao što je opisano u radu [11], računa na osnovu poznatih vrednosti kote nivoa velike vode Z , ukupnog protoka kroz poprečni presek KVV Q i vrednosti globalnog parametra χ (važi za ceo presek):

$$I_e = I_{tr} + I_{rkk} = I_{tr} (1 + \chi) = \left(\frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2 (1 + \chi) \quad (7)$$

gde su K_i protočnosti pojedinačnih segmenata. Globalni parametar χ računa se prema izrazu:

$$\chi = \left(\frac{\sum_i K_i}{\sum_i (K_i / (1 + \chi_i)^{1/2})} \right)^2 - 1 \quad (8)$$

U prethodnom izrazu brojilac predstavlja zbir protočnosti dobijenih podelom preseka na hidraulički homogene delove, a imenilac zbir korigovanih protočnosti segmenata zbog različitog udela komponenti $I_{rkk,i}$ i $I_{tr,i}$ pojedinačnih segmenata u ukupnom nagibu I_e .

Imajući ovo u vidu, integracijom jednačine održanja energije (3) između dva poprečna preseka (uzvodnog, indeks „u“ i nizvodnog, indeks „n“), nakon sređivanja se dobija sledeći izraz za procenu kote nivoa u uzvodnom preseku:

$$Z_u = Z_n + \frac{\alpha_n V_n^2}{2g} - \frac{\alpha_u V_u^2}{2g} + \frac{Q^2}{2} \left(\frac{n_{gl,u} (1 + \chi_u)}{(AR^{2/3})_u^2} + \frac{n_{gl,n} (1 + \chi_n)}{(AR^{2/3})_n^2} \right) \Delta x_{u-n} \quad (9)$$

gde su:

- Z_u i Z_n – kote nivoa;
- α_u i α_n – koeficijenti korekcije kinetičke energije usled neravnomernosti brzine u poprečnom preseku (Koriolisovi koeficijenti);
- A_u i A_n – površine poprečnog preseka;
- R_u i R_n – hidraulički radijusi;

χ_u i χ_n	– globalni parametri;
Q	– ukupan protok kroz KVV;
V_u i V_n	– srednje profilske brzine;
$n_{gl,u}$ i $n_{gl,n}$	– Manningovi koeficijenti rapavosti u glavnom koritu
Δx_{u-n}	– rastojanje izmedju dva poprečna preseka dobijeno ponderisanjem rastojanja po segmentima 1, 2 i 3 prema protoku (videti izraz 5.25 u [16])

Zapaža se da se u izrazu (9) nema članova kojima se opisuju gubici energije usled suženja/proširenja toka. Oni su obuhvaćeni parametrima χ_u i χ_n . Poređenja izmerenih i sračunatih linija nivoa pokazuju da se mogu izostaviti i Koriolisovi koeficijenti α , tj. da se može uzeti da je $\alpha = 1$. Drugim rečima, uvođenjem gubitaka usled razmene KK preko parametra χ , više nema potrebe za korišćenjem koeficijenta neravnomernosti brzine u poprečnom preseku i članova kojima se uzimaju u obzir lokalni gubici energije. To se, međutim, odražava na postupak rešavanja jednačine (9). Kao što je poznato, jednačina (9) rešava se metodom sukcesivnih aproksimacija. Uvođenje parametara χ_i , $i = 1, 2, 3$ zahteva još jedan ciklus unutrašnjih iteracija. U njemu se za svaku novopretpostavljenu vrednost kote nivoa u uzvodnom preseku, rešavanjem nelinearne jednačine (18) iz rada [11] dobija vrednost χ_2 . Preostale dve vrednosti χ_1 i χ_3 , neophodne za računanje globalnog parametra χ , računaju se iz izraza (17a) i (17b) (videti rad [11]).

Na osnovu računskog postupka opisanog u radu [11] i prethodnih napomena u vezi sa rešavanjem jednačine (9), napisan je program MRKKLIN. Program je u ovom radu korišćen za proračun nejednolikog tečenja u neprizmračnom, dvogubom pravougaonom KVV.

4. PROVERA MODELA

Za podešavanje vrednosti parametara matematičkog modela opisanog u tački 2 i njegovu proveru korišćeni su rezultati merenja u kanalima iz Hidrauličke laboratorije UCLA.

4.1 Opis laboratorijskih kanala i ogleda

Kao što je u uvodu rečeno, program MRKKLIN je proveren korišćenjem rezultata laboratorijskih ogleda izvedenih na modelima KVV sa obostrano proširujućim i obostrano sužavajućim plavnim površinama. Svi modeli su napravljeni u hidrauličkoj laboratoriji UCL u Belgiji u pravougaonom laboratorijskom kanalu dugačkom 10 m i širokom 1,20 m. Dvogubo simetrično pra-

vougaono KVV napravljeno je od obložene šperploče. Širina glavnog korita je ista duž celog kanala i iznosi 0,40 m. Obe plavne površine izdignute su po 0,05 m iznad dna glavnog korita, čiji je nagib $I_d = 0,99 \cdot 10^{-3}$. Najveća širina jedne plavne površine je 0,40 m. Proširenja i suženja pravljena su pomoću vertikalnih zidova od obložene šperploče. Napravljene su dve varijante suženja i dve varijante proširenja (slika 4). U varijantama sa proširenjem pravougaoni kanal je povećanjem širine plavnih površina od 0,00 m do 0,40 m pretvoren u prizmračno dvogubo pravougaono KVV. Proširenje je u prvoj varijanti izvedeno na dužini od 6,0 m (Pro6, slika 4a), dakle pod uglom od $3,8^\circ$, a u drugoj, na dužini od 4,0 m (Pro4, slika 4b) ili pod uglom od $5,7^\circ$. S druge strane, u varijantama sa suženjem, dvogubo prizmračno korito je smanjivanjem širine plavnih površina sa 0,40 m na 0,00 m uvedeno u pravougaoni kanal širine 0,40 m. Dužina suženja u prvoj varijanti iznosi 6,0 m (Su6, slika 4c), a u drugoj, 2,0 m (Su2, slika 4d). To znači da se u varijanti Su6 plavne površine sužavaju, pod uglom od $3,8^\circ$, a u varijanti Su4, pod uglom od $11,2^\circ$.

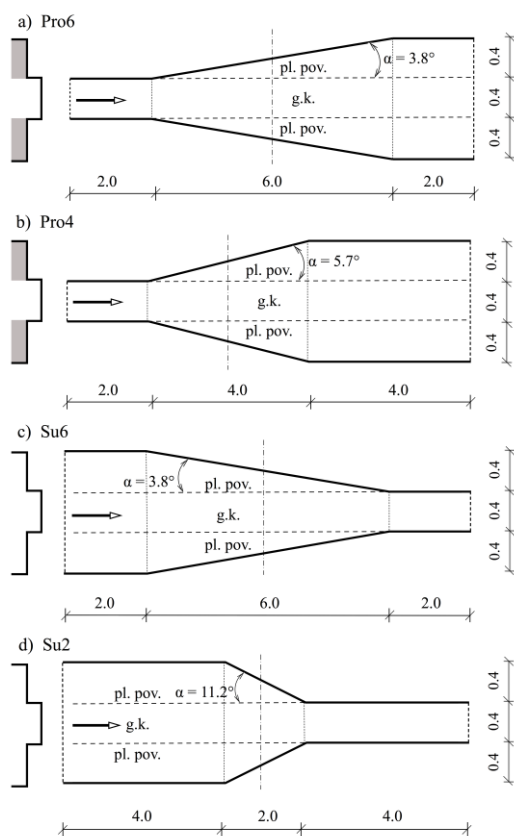
Svi ogledi osmišljeni su tako da se u preseku na sredini proširenja/suženja (gde je $B_{pp} = 0,20$ m) manevrom ustave na nizvodnom kraju kanala, pri datom protoku, ostvari željena vrednost relativne dubine $H_* = (H - h) / H$ (videti sliku 1). Razmatrane su tri vrednosti relativne dubine: $H_* = \{0,20; 0,30; 0,50\}$, a protoci u KVV varirani su u rasponu od 2 do 28 l/s. Razmatrane kombinacije ukupnog protoka i relativne dubine H_* date su u tabeli 1. U svakom ogledu merene su: 1) linija nivoa duž osovine glavnog korita, 2) nivoi po širini korita u nekoliko poprečnih preseka i 3) raspored brzine u tim poprečnim presecima. Nivoi su mereni automatski pomoću merne igle postavljene na kolica. Zbog talasa na površini vode, tačnost merenja nivoa nije odgovarala nominalnoj tačnosti merene igle (0,1 mm), već je procenjeno da iznosi 0,2 mm. Brzine su merene sa tačnošću $\pm 2\%$ pomoću Pitoove cevi povezane za diferencijalni manometar. Na osnovu izmerenih rasporeda brzina utvrđena je raspodela protoka između glavnog korita i plavnih površina.

4.2 Linije nivoa

Podaci o izmerenim linijama nivoa iskorišćeni su za kalibraciju parametara modela ψ' i ψ^s i vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti u GK i na PP. S obzirom na to da su ogledi sa obostrano proširujućim i obostrano sužavajućim PP predstavljali dve nezavisne serije, optimalne vrednosti Manningovog koeficijenta ra-

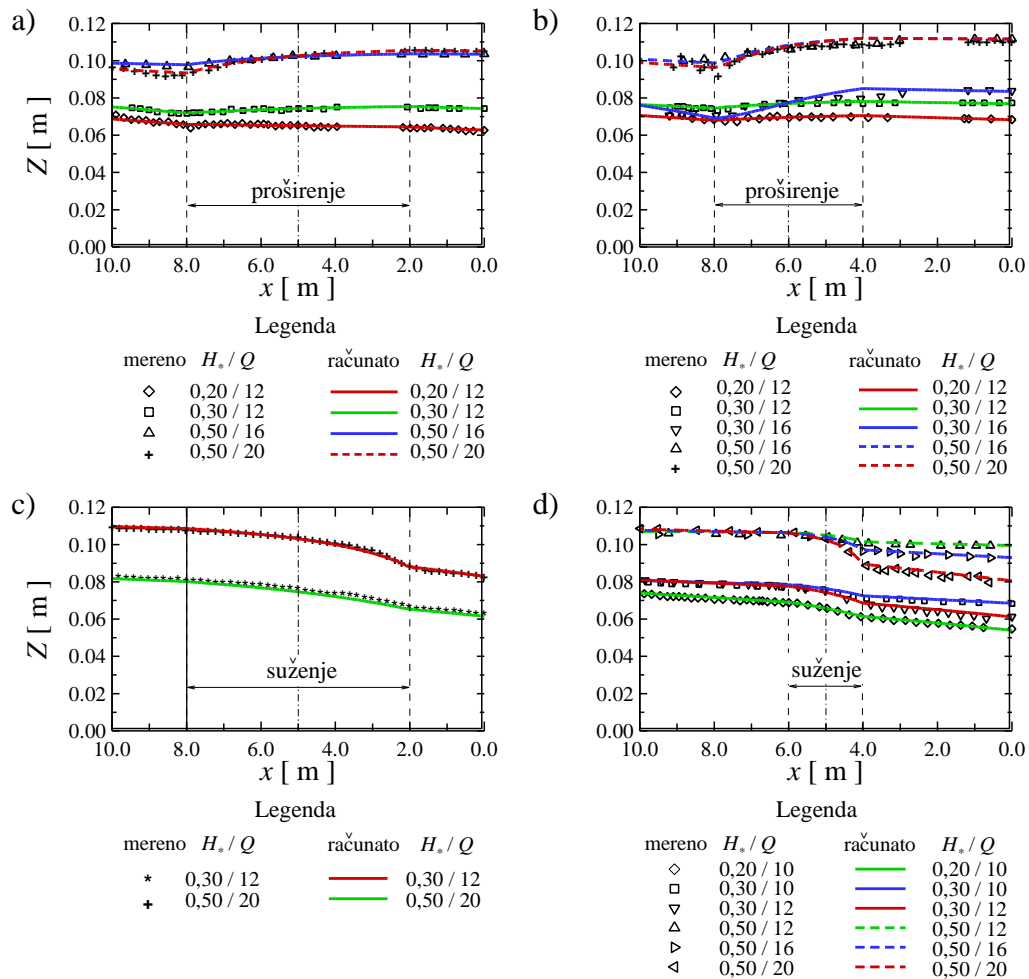
Tabela 1. Ogladne postavke neprizmatičnog KVV i razmatrane kombinacije ukupnog protoka Q i relativne dubine H_*

ogledna postavka	oznaka	opis	Q [l/s]		
			$H_* = (H - h) / H = h_{pp} / H$ [/]		
			0,20	0,30	0,50
1	Pro6	obostrano proširujuće pp, ugao širenja $\approx 3,8^\circ$ (pp se proširuju na dužini od 6 m)	12	15	16 23
2	Pro4	obostrano proširujuće pp, ugao širenja $\approx 5,7^\circ$ (pp se proširuju na dužini od 4 m)	12	12 27	25 27
3	Su6	obostrano sužavajuće pp, ugao suženja $\approx 3,8^\circ$ (pp se sužavaju na dužini od 6 m)		12	20
4	Su2	obostrano sužavajuće pp, ugao suženja $\approx 11,3^\circ$ (pp se sužavaju na dužini od 2 m)	10	10 12	12 16 20



Slika 4. Osnove neprizmatičnih laboratorijski kanala iz tabele 1

pavosti se za ove dve grupe oglada razlikuju. U ogledima sa proširujućim PP vrednosti u GK (n_{gl}) i na PP (n_{pp}) pri $H_* = 0,20$ veće su ($n_{gl} = 0,0107 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ i $n_{pp} = 0,0117 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$) od onih pri $H_* \geq 0,30$ ($n_{gl} = 0,009 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ i $n_{pp} = 0,0093 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$), dok su u ogledima sa sužavajućim PP ove vrednosti nezavisne od H_* i iznose $n_{gl} = 0,013 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ i $n_{pp} = 0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Optimalna vrednost parametra ψ' u najvećem broju oglada, nezavisno od geometrije neprizmatičnog korita iznosi 0,02, što odgovara onoj koju su saopštili Prust i ost. [19] za MNS. Izuzetak predstavljaju dva oglada iz serije Su2 u kojima je optimalna vrednost $\psi' = 0,05$. To su ogledi sa $Q = 10 \text{ l/s}$ i $H_* = 0,20$, i $Q = 20 \text{ l/s}$ i $H_* = 0,50$. Najpovoljnija vrednost parametra je ψ^g je 1,0, što je takođe u skladu sa nalazom Buzmara i ost. [7]. Jedino je kod izraženog suženja (Su2) pri $H_* \leq 0,30$ optimalna vrednost parametara $\psi^g = 0,5$. Kada je reč o korišćenju Koriolisovog koeficijenta α , pokazalo se da je on u proračunima linije nivoa neophodan samo u slučaju Pro4 pri protocima $Q \geq 16 \text{ l/s}$ i $H_* \geq 0,30$, jer su tada, kako pokazuju merenja površinske brzine i brzine u poprečnim presecima u proširenju (videti rad [8]), gradijenti brzine po širini poprečnog preseka najveći. U nastavku istraživanja trebalo bi detaljnije ispitati opseg fizički realnih vrednosti parametra ψ^g s obzirom na to da on ukazuje na prirodu promene napona smicanja na plavnim površinama, pa, prema tome, i na promenu nagiba linije energije usled trenja duž plavne površine.



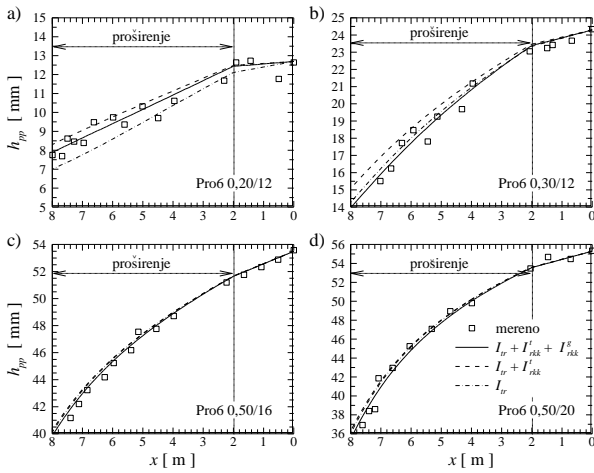
Slika 5. Poređenje računskih i izmerenih linija nivoa za: a) Pro6, b) Pro4, c) Su6 i d) Su2 za razmatrane kombinacije ukupnog protoka Q i relativne dubine H_* (videti tabelu 1)

Slika 5 prikazuje izmerene i izračunate linije nivoa za sve kombinacije geometrija, protoka i relativnih dubina u preseku na sredini suženja iz tabele 1. Izračunate linije nivoa odgovaraju optimalnim vrednostima para-metara ψ' i ψ^s . Već samo vizuelno poređenje ukazuje na zadovoljavajuće slaganje, a kvantitativno poređenje izmerenih i izračunatih dubina duž osovine glavnog korita pokazuje da relativno odstupanje za geometriju Pro6 ne prelazi 3,6%, za Pro4, 7,0%, dok su za geometrije Su6 i Su2 najveća odstupanja, redom, 2,2% i 3,0%.

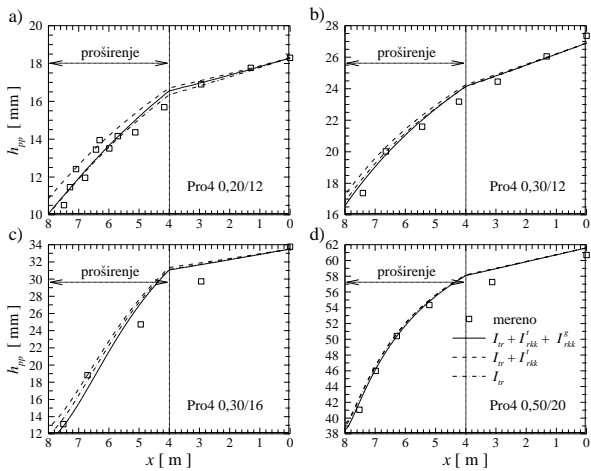
4.3 Dubine na plavnim površinama

Promene dubina na plavnim površinama za ispitivane geometrije KVV prikazane su na slikama 6–9. Uočava se da je u slučaju sužavajućih PP (slike 8 i 9) doprinos „geometrijske” razmene količine kretanja veći nego u slučaju njihovog

proširivanja (slike 6 i 7). U delu sa neprizmatičnim koritom najbolje slaganje izmerenih i izračunatih dubina postiže se uključivanjem geometrijske razmene protoka/količine kretanja, dok na dugačkim prizmatičnim deonicama (slučaj Su2, slika 9) glavnu ulogu u razmeni količine kretanja ima turbulentna difuzija. Zbog toga duž ovih deonica bolje slaganje sa merenjima daje linija nivoa koja je računata uzimanjem u obzir samo RKK posredstvom turbulentne difuzije. Kod dugačkih, blagih suženja (slučaj Su6, slika 8) ova pojava nije tako izražena, jer je uzvodna prizmatična deonica znatno kraća od one u slučaju Su2. Na njoj se još uvek osećaju nizvodni uticaji gde dominantnu ulogu ima geometrijska razmena. Ono što pri poređenju rezultata proračuna i merenja svakako treba imati na umu jeste da su dubine na PP male i da su, stoga, neizvesnosti merenja veće. Iz istog razloga se i najveća odstupanja, koja u slučaju linija

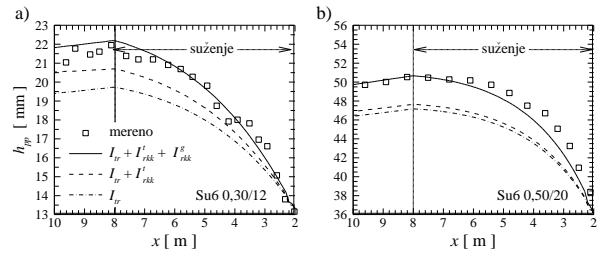


Slika 6. Poređenje izmerenih i izračunatih dubina na plavnim površinama za geometriju Pro6 i razmatrane kombinacije vrednosti protoka i relativne dubine H_* u slučajevima kada se: 1) u obzir uzima samo trenje, 2) uz trenje uzima i razmena KK posredstvom turbulentne difuzije i 3) svemu ovome doda još i „geometrijska” razmena

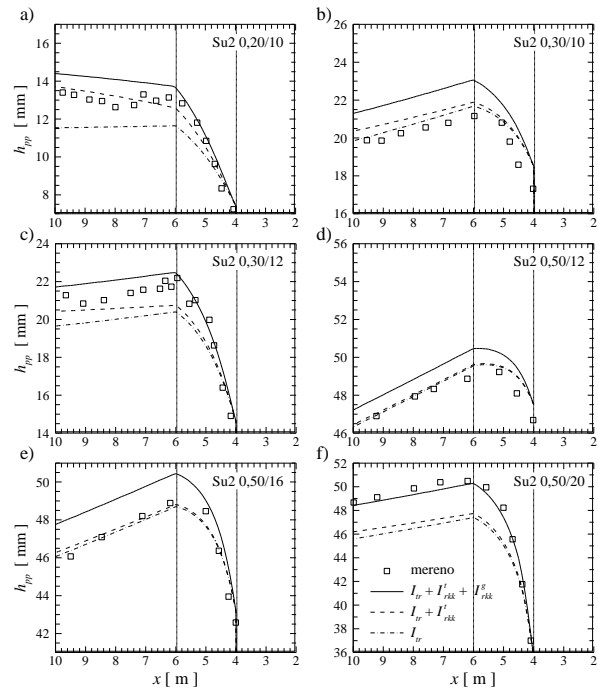


Slika 7. Poređenje izmerenih i izračunatih dubina na plavnim površinama za geometriju Pro4 i razmatrane kombinacije vrednosti protoka i relativne dubine H_* u slučajevima kada se: 1) u obzir uzima samo trenje, 2) uz trenje uzima i razmena KK posredstvom turbulentne difuzije i 3) svemu ovome doda još i „geometrijska” razmena

nivoa izračunatih uzimanjem u obzir „geometrijske” razmene (Su 2 0,30/10 i Su2 0,50/10 na slici 9), ne prelaze 10%, sa inženjerskog stanovišta mogu smatrati prihvatljivim.



Slika 8. Poređenje izmerenih i izračunatih dubina na plavnim površinama za geometriju Su6 i razmatrane kombinacije vrednosti protoka i relativne dubine H_* u slučajevima kada se: 1) u obzir uzima samo trenje, 2) uz trenje uzima i razmena KK posredstvom turbulentne difuzije i 3) svemu ovome doda još i „geometrijska” razmena



Slika 9. Poređenje izmerenih i izračunatih dubina na plavnim površinama za geometriju Su2 i razmatrane kombinacije vrednosti protoka i relativne dubine H_* u slučajevima kada se: 1) u obzir uzima samo trenje, 2) uz trenje uzima i razmena KK posredstvom turbulentne difuzije i 3) svemu ovome doda još i „geometrijska” razmena

Zanimljivo je zapaziti da su pri manjim relativnim dubinama na PP ($H_* < 0,25$) doprinosi turbulentne difuzije i geometrijske razmene približno jednaki (slika 9, Su 2 0,20/10 i slika 8, Su2 0,30/12). Sa povećanjem relativne dubine iznad

$H_* = 0,25$ kod Su2, i iznad 0,30 kod Su6, doprinos turbulentne difuzije se značajno smanjuje u odnosu na „geometrijsku” razmenu (manji je oko 10 puta). Slika 9 pokazuje da se kod kratkih, naglih suženja (Su2) pri velikim relativnim dubinama na PP ($H_* = 0,50$) značaj turbulentne difuzije i „geometrijske” razmene na uzvodnoj prizmatičnoj deonici menja sa promenom protoka. To bi moglo da se objasni činjenicom da pri manjim protocima ($Q \leq 0,16$ l/s) poprečni presek i pored toga što je H_* veliko, još uvek nije hidraulički homogen, pa na tečenje dominantan uticaj ima turbulentna difuzija. Pri većim protocima ($Q = 0,20$ l/s) poprečni presek postaje hidraulički homogen, tako da se uticaj turbulentne difuzije gubi, a glavnu ulogu preuzima „geometrijska” razmena (slika 9, Su2 0,50/20 i slika 8, Su6 0,50/20). Pošto za Su6 postoje samo merenja pri velikim protocima, prethodna zapažanja vezana za promenu značaja dve komponente RKK kod kratkih suženja treba proveriti i na dugačkim suženjima.

S obzirom na to da se pri vraćanju vode sa PP u GK – sužavajuće PP, tangencijalni napon na PP povećava [6 i 11], uvođenje „geometrijske” razmene doprinosi povećanju nivoa u KVV, odnosno dubine na PP u odnosu na slučaj kada se u obzir uzima samo trenje. Situacija je obrnuta kada se plavne površine proširuju (Pro6, slika 6 i Pro4, slika 7). Tangencijalni napon na PP se smanjuje [6], pa uvođenje „geometrijske” razmene doprinosi sniženju nivoa, odnosno smanjenju dubine na PP u odnosu na slučaj kada se u obzir uzme samo turbulentna difuzija. Štaviše, pri većim vrednostima relativne dubine, $H_* > 0,25$, uzimanje u obzir samo turbulentne difuzije ima kontraefekat – povećanje dubina u odnosu na slučaj kada se proračunima obuhvata samo trenje. Ova konstatacija važi nezavisno od stepena proširenja (i za Su6 i za Su2). Za razliku od suženja, kod kojih je za valjanu procenu dubine na PP pri velikim relativnim dubinama H_* bitno da se proračunima obuhvate i turbulentna difuzija i „geometrijska” razmena, kod proširujućih PP to postaje praktično beznačajno (slika 6, Pro6 0,50/16 i Pro6 0,50/20 i slika 7, Pro4 0,50/20).

4.4 Raspodela protoka u KVV

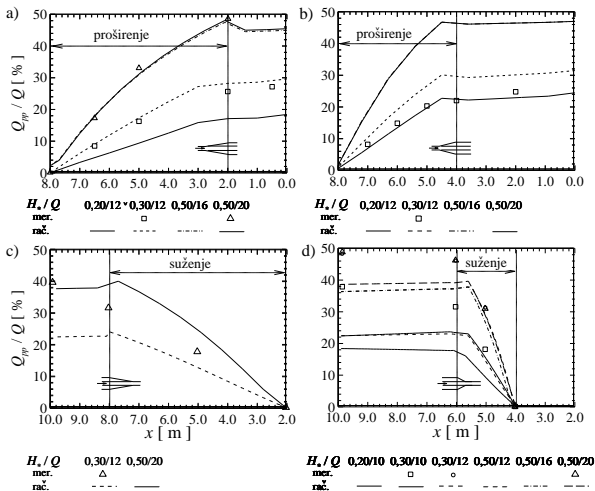
Poređenje procentualnog učešća protoka na plavnim površinama u ukupnom protoku (Q_{pp} / Q) sa vrednostima dobijenim na osnovu merenja rasporeda brzina (slika 10) pokazuju da se najbolje procene raspodele protoka primenom MRKK postižu kod dugačkih proširujućih plavnih površina (Pro6, slika 10a). Procentualne razlike za obe relativne dubine ($H_* = \{0,30; 0,50\}$) nisu veće od 3%. Kod kratkih proširenja (Pro4, slika 10b), MRKK precenjuje vrednosti protoka Q_{pp} , ali razlike u procentualnom učešću u odnosu na merenja ne

prelaze 8%. Na sužavajućim PP efekat je suprotan – MRKK potcenjuje protoke Q_{pp} . U dugačkim, blagim suženjima procentualno učešće je za 5 – 8% manje od izmerenog (Su6, slika 10c). Metoda RKK raspodelu protoka unutar kratkog suženja dobro procenjuje – razlike između izmerenog i sračunatog učešća ne prelaze 2,5% ni za jedno H_* (Su2, slika 10d). Na uzvodnoj, prizmatičnoj deonici KVV, gde su uočena veća odstupanja sračunatih od izmerenih dubina (slika 9), razlike se povećavaju do 15%, bez obzira na geometriju KVV u planu. Zanimljivo je još uočiti da je bez obzira na geometriju KVV u planu učešće protoka na PP u ukupnom protoku KVV, (pa dakle, i procentualna raspodela protoka između GK i PP u ukupnom protoku KVV) za datu vrednost relativne dubine H_* (u preseku na sredini suženja) nezavisna od ukupnog protoka.

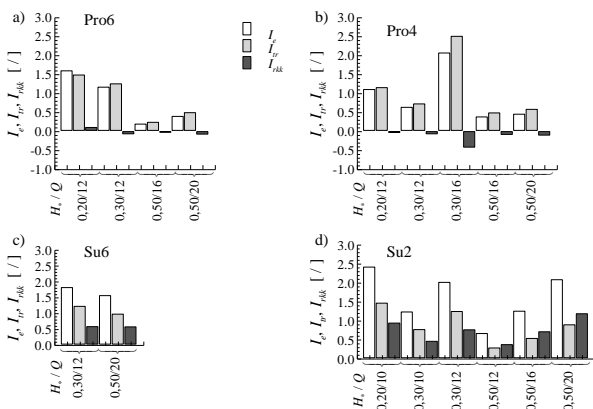
4.5 Gubici mehaničke energije

Ukupan gubitak energije u sebi sadrži gubitak energije usled trenja i gubitak energije usled razmene količine kretanja (videti jednačinu 3). Slika 11 pokazuje raspodelu ukupnog nagiba linije energije u poprečnom preseku KVV na ove dve komponente za sve razmatrane geometrije KVV i sve kombinacije protoka i relativne dubine H_* (tabela 1). Odmah se uočava da isticanje vode iz GK na PP (negativna vrednost I_{rkk}) u koritima sa proširujućim PP, smanjuje ukupan gubitak energije I_e u odnosu na KVV sa sužavajućim PP. Primera radi, za $Q = 12$ l/s i $H_* = 0,30$, vrednost I_e u slučaju Pro6 iznosi $1,17 \cdot 10^{-3}$, a u slučaju Su6, $1,82 \cdot 10^{-3}$, dok je za kombinaciju $Q = 20$ l/s i $H_* = 0,50$, ta razlika još izraženija: $I_e = 0,4 \cdot 10^{-3}$ za Pro6 i $I_e = 2,1 \cdot 10^{-3}$ za Su6 (slike 11a i 11c). Ukupan gubitak I_e pri datom protoku smanjuje se sa povećanjem vrednosti relativne dubine H_* nezavisno od geometrije KVV u osnovi (slike 11a, 11b i 11d), ali se za fiksno H_* povećava sa povećanjem protoka. Znatno izraženije povećanje I_e pri $H_* = 0,30$ u odnosu na $H_* = 0,50$ kod naglo proširujućih (Pro4) i naglo sužavajućih (Su2) plavnih površina treba detaljnije ispitati u nastavku istraživanja. Pretpostavlja se da je ono posledica prirode tečenja koja se menja usled promene oblika rasporeda brzine po širini korita – tačka infleksije (prevojna tačka) postepeno se gubi, jer se smanjuje gradijent brzine između GK i PP.

U KVV koja se šire, udeo nagiba linije energije usled trenja u ukupnom nagibu I_e mnogo je veći nego u koritima koja se sužavaju upravo zbog činjenice da je nagib I_{rkk} negativan. Gledano u apsolutnim vrednostima, u koritima koja se šire, udeo I_{rkk} u ukupnom gubitku I_e ,



Slika 10. Procentualno učešće protoka na plavnim površinama u ukupnom protoku KVV: a) Pro6, b) Pro4, c) Su6 i d) Su2



Slika 8. Ukupan gubitak energije i njegova raspodela na deo koji potiče od trenja i deo koji potiče od razmene količine kretanja između GK i PP za: a) Pro6, b) Pro4, c) Su6 i d) Su2 pri različitim kombinacijama protoka i dubina na plavnim površinama (tabela 1)

manji je nego u koritima koja se sužavaju. Navode se samo vrednosti za Pro6 i Su6. U kombinaciji $Q = 12$ l/s i $H_* = 0,30$: $|I_{rkk}| = 7,7\%$ za Pro6 i $|I_{rkk}| = 32,6\%$ za Su6. Pri većoj relativnoj dubini, $H_* = 0,50$ i $Q = 20$ l/s, ova razlika je manja: $|I_{rkk}| = 24,4\%$ za Pro6 i $|I_{rkk}| = 37,2\%$ za Su6.

Zanimljivo je još uočiti da se kod naglih suženja korita pri velikim dubinama na PP ($H_* = 0,50$) sa povećanjem ukupnog protoka udeo I_{rkk} povećava, a udeo I_{tr} smanjuje.

Kada je $H_* \leq 0,30$ $I_{tr} / I_e \approx 61\%$, a $I_{rkk} / I_e = 39\%$, dok su za $H_* = 0,50$ ti odnosi $I_{tr} / I_e \approx 43\%$ a $I_{rkk} / I_e \approx 57\%$.

6. ZAKLJUČCI

U radu je prikazano kako se MRKK, koja je ranije korišćena za procenu krive protoka u prizmatičnom KVV, može primeniti za proračune linijskog ustaljenog nejednolikog tečenja u neprizmatičnom KVV. Razmatrani su slučajevi tečenja u dvogubom pravougaonom koritu sa obostrano proširujućim i obostrano sužavajućim plavnim površinama pri različitim stepenima proširenja/suženja. Model je proveren korišćenjem rezultata laboratorijskih oglada iz literature. Ovi rezultati poslužili su za kalibraciju parametara modela i ocenu njegove uspešnosti u procenama: 1) linije nivoa u KVV, 2) raspodele protoka između GK i PP i 3) udela gubitaka usled trenja i razmene količine kretanja u ukupnom gubitku energije. Optimalne vrednosti parametara $\psi' = 0,02$ i $\psi' = 1,0$ odgovaraju optimalnim vrednostima u metodi nezavisnih segmenata saopštenim u literaturi.

Poređenja sa merenjima dovela su do sledećih zaključaka:

1. U proračunima linije nivoa primenom MRKK nije potrebno korišćenje koeficijenata lokalnih gubitaka na suženju i/ili proširenju i Koriolisovog koeficijenta α , jer su lokalni gubici i neravnomernost rasporeda brzine u poprečnom preseku obuhvaćeni gubicima usled „geometrijske“ razmene količine kretanja. U slučaju Koriolisovog koeficijenta izuzetak predstavljaju nagla proširenja pri velikim vrednostima protoka i relativnih dubina H_* na plavnim površinama kada su gradijenti brzina u poprečnom preseku najveći, pa bi ovom pitanju trebalo posvetiti više pažnje u nastavku istraživanja.
2. Poređenjem izmerenih i sračunatih linija nivoa pokazuje se da se primenom tradicionalnog pristupa, u kojem se ukupan gubitak energije računa sabiranjem gubitaka usled trenja i lokalnih gubitaka, nivoi u KVV potcenjuju (odstupanje u odnosu na uzmerene vrednosti prelaze 10%). Gubici u KVV bolje se obuhvataju kada se modelira razmene količine kretanja između GK i PP, pa su slaganja sračunatih i izmerenih linija nivoa, bilo da je reč o suženju ili proširenju, znatno bolja – najveće odstupanje ne prelazi 4%.
3. Kada je reč o proceni dubine na PP, doprinos „geometrijske“ razmene KK u sužavajućim KVV veći je nego u proširujućim koritima.

4. U neprizmatičnim KVV sa sužavajućim PP doprinosi turbulentne difuzije i „geometrijske“ razmene približno su jednaki sve dok je $H_* \leq 0,25$. Sa povećanjem vrednosti relativne dubine, doprinos turbulentne difuzije smanjuje se za čitav red veličine, jer poprečni presek KVV postaje hidraulički homogen.
5. „Geometrijska“ razmena ima suprotan uticaj na vrednosti dubina na sužavajućim i proširujućim PP kada se dubine porede sa onim dobijenim tradicionalnim metodama u kojima se uzimaju u obzir samo gubici usled trenja. Na sužavajućim PP ona doprinosi povećanju vrednosti dubina, a na proširujućim, njihovom smanjenju, s tim što se u oba slučaja procena dubine poboljšava.
6. Za datu vrednost relativne dubine raspodela protoka na GK i PP u preseku na sredini neprizmatične deonice, nezavisna je od ukupnog protoka KVV bez obzira na geometriju KVV u osnovi.
7. Metoda razmene količine kretanja precenjuje vrednosti protoka na PP koje se šire, a potcenjuje na PP koje se sužavaju, ali u oba slučaja odstupanja od izmerenih vrednosti ne prelaze 8%. Najbolja slaganja postižu se kod blagih proširenja (odstupanja su manja od 3%) i kod naglih suženja u neprizmatičnom delu kanala, gde ne prelaze 2,5%.
8. Nagibi linije energije usled trenja i usled razmene količine kretanja nisu istog znaka na PP koje se šire, pa je ukupan gubitak energije manji nego na PP koje se sužavaju.
9. Povećanje relativne dubine na PP dovodi do smanjenja ukupnog gubitka energije nezavisno od izgleda KVV u osnovi (suženje ili proširenje), ali se za dato H_* povećava sa povećanjem protoka.
10. Udeo nagiba linije energije usled razmene količine kretanja u ukupnom nagibu (I_{rkk} / I_e) znatno je manji u KVV koja se šire: 7,7% u blagom proširenju i 32,6% u blagom suženju pri $Q = 12$ l/s i $H_* = 0,30$.
11. U naglim suženjima učešća I_{rkk} / I_e i I_{tr} / I_e menjaju se sa promenom vrednosti relativne dubine H_* . Pri $H_* \leq 0,30$, dominira trenje ($I_{tr} / I_e \approx 60\%$), a pri $H_* = 0,50$, razmena količine kretanja ($I_{rkk} / I_e \approx 57\%$).

Na osnovu svega iznetog, zaključuje se da MRKK daje pouzdanije procene linije nivoa u KVV od tradicionalnog postupka. Zbog toga se preporučuje njena primena u analizi tečenja u neprizmatičnim KVV.

LITERATURA

- [1] Ackers, P.: Flow formulae for straight two-stage channels, *J. Hydr. Res.*, 31(4), 509-531, 1993.
- [2] Antonić, V. i Babić Mladenović, M. (2015): Zaštita Beograda od velikih voda Dunava i Save, *Zbornik radova sa 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 766-774.
- [3] Babić Mladenović, M., i Kolarov, V. (2015): Plan upravljanja rizicima od poplava na slivu Dunava, *Zbornik radova sa 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 755-765.
- [4] Babić Mladenović, M., Kolarov, V., Bartoš Divac, V. (2015): Odbrana od poplava na Savi 2014 - iskustva i planovi za unapređenje sistema zaštite, *Zbornik radova sa 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 716-725.
- [5] Babić Mladenović, M., i Kolarov, V. (2015): Šta posle poplave 2014?, *Zbornik radova sa 17. Naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 738-747.
- [6] Bousmar, D. and Zech, Y. (1999): Momentum transfer for practical flow computation in compound channels, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, 125(7), 696-706.
- [7] Bousmar, D., N. Wilkin, J. H. Jacquemart, and Y. Zech (2004): Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains, *J. Hydraul. Eng.*, 130(4), 305– 312, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429 (2004) 130:4(305).
- [8] Bousmar, D., S. Proust, and Y. Zech (2006): Experiments on the flow in a enlarging compound channel, in *River Flow 2006: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Lisbon, Portugal, 6 –8 September 2006, edited by R. M. L. Ferreira et al., pp. 323– 332, Taylor and Francis, Leiden, Netherlands.
- [9] Damjanović, V i Malešev, M. (2015): Poplave 2014. godine na reci Jadar, *Zbornik radova sa 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 726-737.
- [10] Đorđević, B., Dašić, T. (2015): Ekspertni sistemi za planiranje i operativno sprovođenje odbrane od poplava, *Vodoprivreda*, 276-278, Vol. 47, br. 1-3, str. 187-202, ISSN 0350-0519, COBISS.SR-ID 132119.
- [11] Đorđević, D., Stojnić, I. i Muhić, F. (2015): Prikaz modela linijskog tečenja u koritu za veliku vodu

- zasnovanog na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, *Vodoprivreda*, 273-275, Vol. 47, br. 1-3, str. 79-91, ISSN 0350-0519, COBISS.SR-ID 132119.
- [12] Knežević, Z., Bartoš Divac, V. i Malešev, M. (2015): Nove mere zaštite grada Paraćina posle poplave 2014. godine, *Zbornik radova sa 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 775-784.
- [13] Knight, D.W., Aya, S., Ikeda, S., Nezu, I. and Shiono, K. (2009): *Flow structure*, Flow and sediment transport in compound channels, ed. Ikeda, S. and McEwan, I.K., IAHR Monograph Series.
- [14] Kolarov, V., Babić-Mladenović, M (2010): Podaci za izradu preliminarne procene rizika od poplava na teritoriji Republike Srbije, *Vodoprivreda*, Vol. 42, br. 1-3, str. 79-86.
- [15] Krunić, B., Malešev, M. i Damjanović V. (2015): Uzroci plavljenja Baričke reke i potrebne mere zaštite od poplava, *Zbornik radova sa 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja*, Vršac, str. 785-792.
- [16] Jovanović, M. (2008): *Regulacija reka*, Građevinski fakultet – Beograd
- [17] Jovanović, M., Prodanović, D., Plavšić, J., Rosić, N. (2014): Problemi pri izradi karata ugroženosti od poplava, *Vodoprivreda*, 267-272, Vol. 46, br. 1-6, str. 3-13, ISSN 0350-0519.
- [18] Jovanović, M., Todorović, A., Rodić, M., (2009): Kartiranje rizika od poplava, *Vodoprivreda*, Vol. 41, br. 1-3, str. 31-45.
- [19] Proust, S., Bousmar, D., Riviere, N., Paquier, A. and Zech, Y. (2009): Nonuniform flow in compound channel: A 1-D method for assessing water level and discharge distribution, *Water Resour. Res.*, 45, W12411, doi: 10.1029/2009WR008202.
- [20] Radojković, M. (1980): Matematički model kretanja vode u otvorenim tokovima složenog preseka, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd.
- [21] Stojnić, I., Muhić, F. i Đorđević, D., (2015): Primena modela razmene količine kretanja u analizi uticaja geometrije i hidrauličkih otpora na osnovne odlike tečenja u koritu za veliku vodu, *Vodoprivreda*, 276-278, Vol. 47, br. 1-3, str. 261-268, ISSN 0350-0519, COBISS.SR-ID 132119.
- [22] Wormleaton, P.R. and Merret, D.J.: An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main-channel/flood plain sections, *J. Hydr. Res.*, 28(2), 157-174, 1990.

WATER PROFILE COMPUTATIONS IN NON-PRISMATIC COMPOUND CHANNELS
WITH SIMPLE CROSS-SECTIONAL GEOMETRY
USING EXCHANGE DISCHARGE MODEL

by

Dejana ĐORĐEVIĆ¹, Ivan STOJNIC², Nikola ROSIĆ¹

¹Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

²IST Lisbon, Portugal, EPFL, Lausanne, Switzerland

Summary

The paper aims at presenting possibilities of the exchange discharge model (EDM) in 1D non-prismatic compound channel flow modelling to the Serbian hydraulic engineering community. The model has been already successfully applied for the estimation of a rating curve in a two-stage channel based on the recorded water level, but it can be also used for the estimation of the slope of the energy grade-line for non-uniform flow calculations in a flooding river once the flood discharge is known. As such, the EDM can be used both in the flood risk assessment and the reconstruction of the flood event. The model is calibrated and tested against the experimental data from straight, non-prismatic channels with symmetrically enlarging and symmetrically narrowing floodplains with

different degrees of expansion and contraction (gradual and abrupt expansions / contractions). Moreover, the model results are compared to those obtained with the traditional models that are still used in everyday engineering practice. It is readily demonstrated that traditional models underestimate water levels by more than 10%, while the EDM provides better agreement with measured ones (discrepancies are less than 3%). Acceptable level of agreement is also attained with the discharge distribution between the main channel and floodplains – discrepancies do not exceed 3%, and in one case only they reach 8%.

Key words: compound channel, water profile, 1D flow model, momentum transfer, energy slope

Redigovano 28.10.2017.